

# **Computertomographische Untersuchung des Ermüdungsverhaltens eines hybriden automobilen Fahrwerksbauteils aus Aluminium und CFK**

*M. Ellouz, T. Kordisch*

*Fachhochschule Bielefeld, Bielefelder Institut für Angewandte Materialforschung*

*manel.ellouz@fh-bielefeld.de*

*J. Löseke, T. Tröster*

*Universität Paderborn, Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil*

*julian.loeseke@uni-paderborn.de*

---

## **Abstract**

Ziel dieser Arbeit ist die computertomographische Untersuchung eines hybriden Längslenkers aus Aluminium und CFK (kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff) nach einer Ermüdungsbelastung, um die dabei entstehenden Versagensmechanismen zu bestimmen. Der Längslenker ist Teil der Radaufhängung am Automobil und wird mit Hilfe eines optimierten Prepreg-Press-Prozesses hergestellt. Dabei werden CFK-Prepregs mit Hilfe eines partiell temperierten Werkzeuges in das zuvor umgeformte, gekühlte Aluminiumbauteil eingeformt und ausgehärtet, wodurch thermische Eigenspannungen und daraus resultierender Verzug des Bauteils reduziert werden können. Anschließend wird der hybride Längslenker zyklisch im Zugschwellbereich mit einer Amplitude von 5 kN um die Mittelspannung von 9 kN bei einer Frequenz von 2 Hz belastet. Mittels Computertomographie wird das Bauteil vor der Belastung auf Fertigungsfehler überprüft, welche einen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten des Bauteils haben könnten. Da während der Belastung zunächst ein kontinuierliches aber kein plötzliches Versagen erwartet wird, soll nach einer ersten Belastungsstufe, indem bemerkbar die ersten Ermüdungserscheinungen auftreten, die Computertomographie (CT) verwendet werden, um die Versagensmechanismen im Werkstoff erkennen und untersuchen zu können. Die CT-Ergebnisse zeigen, dass das Bauteil im unbelasteten Zustand keine erkennbaren fertigungsbedingten Fehler aufweist. Nach dem Ermüdungsversuch konnten in einem Bauteilbereich, der aus vorangegangenen FEM-Simulationen als auch aus dem statischen Zugversuch als kritisch bewertet wurde, deutlich sichtbare Schädigungen im Bauteil beobachtet werden. Typische Versagensmechanismen wie Zwischenfaserbruch, sowie

Delaminationen wurden mittels CT detektiert, wobei Delaminationen hauptsächlich an der Grenzschicht zwischen Aluminium und CFK in engen Radien auftreten.

---

## **1 Einleitung**

Leichtbau ist heutzutage in nahezu allen Branchen bedeutend, u.a. im Fahrzeugbau, im Schiffbau und im Flugzeugbau, wo eine Gewichteinsparung eine wirkungsvolle Maßnahme zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen darstellt. Faserverbundkunststoffe (FVK) bieten durch ihre hohe Festigkeit und Steifigkeit bei geringem spezifischen Gewicht ein hohes Leichtbaupotential, verursachen als Hightech-Materialien allerdings hohen Anschaffungs- und Verarbeitungskosten. Daher werden zunehmend belastungsangepasste Hybridwerkstoffe aus Metall mit lokalen oder flächigen Verstärkungen aus FVK an den hoch belasteten Stellen eingesetzt, wodurch Kosten gespart und gleichzeitig Gewicht reduziert werden kann. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Längslenker als Teil der Rad-aufhängung am Automobil mittels eines optimierten Prepreg-Press-Prozesses hergestellt. Dabei soll, als Ersatz zu den herkömmlich eingesetzten Stahlwerkstoffen, ein hybrides Bauteil aus Aluminium und CFK entstehen, um Gewicht einzusparen und gleichzeitig das geforderte Ermüdungsverhalten aufzuzeigen. Mittels eines Ermüdungsprüfstands wurde das Bauteil im Zugschwellbereich auf zyklisches Ermüdungsverhalten hin getestet, wobei es bis zur ersten bemerkbaren Schädigung belastet wird. Um die Versagensmechanismen zu verstehen, wurde die Computertomographie eingesetzt. Dabei wird das Bauteil vor der Belastung auf Herstellfehler und nach der Belastung auf Beschädigungen wie Delaminationen, Faserbrüche und Zwischenfaserbrüche untersucht.

## **2 Experimentelle Durchführung**

### **2.1 Herstellung des Bauteils**

Im Rahmen dieses Projektes wird ein hybrider Längslenker aus Aluminium und CFK für Automobilanwendungen (s. *Abb. 1*) mittels eines temperierten Pressverfahren hergestellt.

Das Pressverfahren für das Herstellen des Hybrid-Bauteils besteht aus drei Prozessschritten. Zunächst werden sieben passend geschnittene 0,23 mm dicke CFK – Prepregs vom Typ SIGRAPREG® C U230-0/NF-E 320/39% auf dem umgeformten Blech aus der Aluminiumlegierung EN AW 6082 T6 positioniert. Der Laminataufbau ist mittels FEM-Simulation so berechnet, dass eine möglichst geringe Verformung unter Zugbelastung auftritt: Laminataufbau (0°/15°/-15°/0°/-15°/15°/0°).

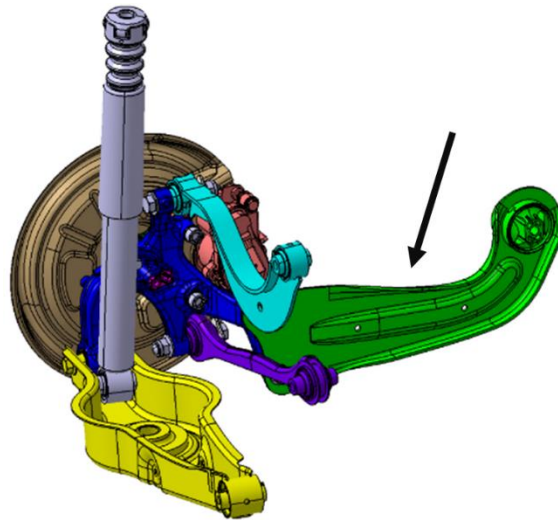


Abb.1: Schematische Darstellung einer Radaufhängung für ein Fahrzeug mit dem betrachteten Längslenker

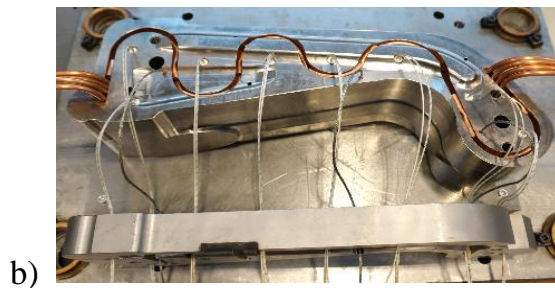
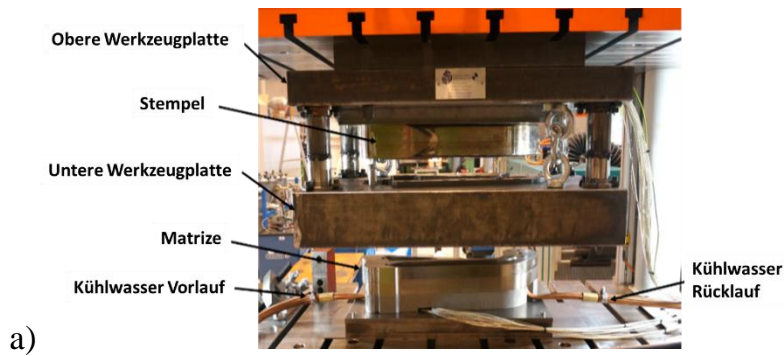


Abb.2: a) Presswerkzeug, b) gekühlte Matrize, c) hergestelltes Bauteil

Wie in Abb. 2 dargestellt, werden im zweiten Schritt die Prepregs mit einem erwärmten Stempel (200°C) bei einer Presskraft von 40 kN gepresst und eingeformt. Die ausgewählten Prozessparameter sind so optimiert, dass im Bauteil eine möglichst konstante Temperatur herrscht. Der Aluminiumbauteil wird während des Prozesses mit Wasser gekühlt, um hohe thermische Ausdehnungen des Metalls zu vermeiden und so auftretende Eigenspannungen zu reduzieren. Hohe Eigenspannungen im Bauteil

beeinflussen das mechanische Verhalten des Werkstoffs und können zu einem frühen Ermüdungsversagen führen. Im dritten Schritt wird das Bauteil dann entnommen und an Luft abgekühlt.

## 2.2 Ermüdungsversuch

Als Längslenker muss das Hybrid-Bauteil im Betrieb Zug- und Druckkräfte aufnehmen. Auf Grund der kritischen Belastungssituationen durch Kreisfahrten, Schlaglöcher, Beschleunigen / Bremsen und Bordsteinkollisionen des realen Bauteils, steht die Fahrwerkkomponente unter zyklischer und schlagartig dynamischer Belastung. Das Ermüdungsverhalten des hergestellten Bauteils wird mittels eines hydraulischen Ermüdungsprüfstands untersucht (Abb. 3). Das Hybrid-Bauteil wurde mit einer mittleren Last von 9kN bei einer Lastamplitude von  $\pm 5\text{kN}$  und einer Frequenz von 2 Hz beansprucht. Dies entspricht einer Maximallast von 14kN und einer Minimallast von 4 kN. Basierend auf quasi-statischen Zugversuchen liegt die maximale Spannung von 14 kN unterhalb der Versagensgrenze des Bauteils, jedoch sind erste Werkstoffschädigungen im Faserverbundwerkstoff zu erwarten. Das Bauteil wurde nach 7200 Schwingspielen auf Beschädigungen untersucht. Zu diesem Zeitpunkt zeigt der gemessene Weg-Zeit-Verlauf eine deutliche Veränderung auf, welcher auf ein erstes Versagen des Bauteils hindeutet.



Abb.3: Hydraulischer Ermüdungsprüfstand mit eingespanntem Längslenker

## 2.3 Computertomographie (CT)

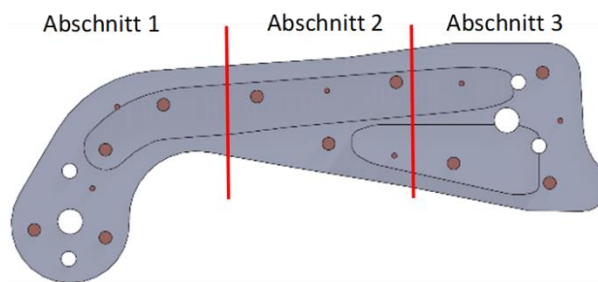
Um die Qualität der Herstellung der Hybrid-Bauteile und die Schädigungsmechanismen während des Ermüdungsbelastung zerstörungsfrei zu bestimmen, wird die Computertomographie angewendet. Dabei kommt ein Computertomograph x|cube 225 der Firma GE Measurements mit Miniröhre zum Einsatz. Als Ergebnis der einzelnen 2D CT-Scans

wird ein rekonstruiertes 3D-Modell erzeugt, das mit der Software VGStudio Max der Firma Volume Graphics analysiert werden kann. Die für die CT-Messungen ausgewählten Parameter sind in *Tab. 1* zusammengefasst. Die einzelnen Parameter wie Spannung, Stromstärke und Filterung sind auf die Dicke und Dichte des untersuchten Materials abgestimmt. Daraus ergibt sich eine CT-Auflösung von 0,2 mm.

*Tab 1: CT- Parameter*

Parameter	Unbelastetes Bauteil	Belastetes Bauteil
Fokus	0,4 mm	1 mm
Spannung	213 kV	225 kV
Stromstärke	3,1 mA	3,9 mA
Filter	4 mm Kupfer	5 mm Kupfer
Belichtungszeit	100 ms	100 ms
Verstärkung	1100	1100
Integrationen	16	16
CT-Schritte	1440	1440

Aufgrund der Bauteilgröße und der eingeschränkten Größe des verfügbaren Detektors ist es nicht möglich, das komplette Bauteil in einem CT-Scan zu erfassen. Deshalb wurde das Bauteil in drei Abschnitten separat gescannt (siehe *Abb. 4*).

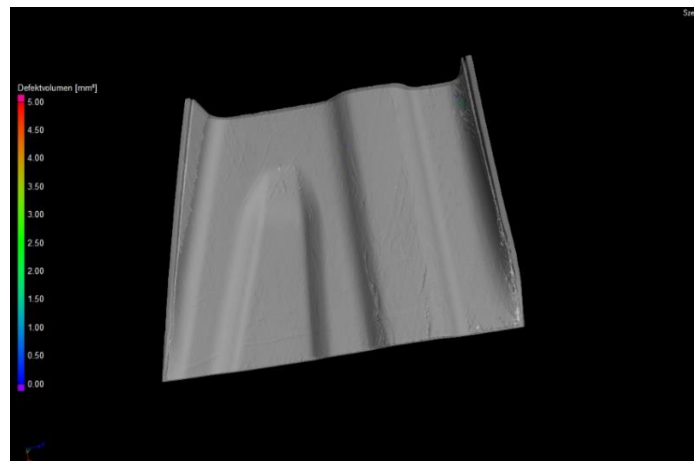


*Abb.4: Schematische Darstellung der CT-Scanbereiche des betrachteten Bauteils*

### 3 Ergebnisse und Interpretation

#### 3.1 Computertomographische Untersuchung des unbelasteten Bauteils

Ein Teilbereich des Hybrid-Bauteils wurde nach der Herstellung aber vor dem Ermüdungsversuch mittels CT untersucht, um die Qualität des Bauteils zu kontrollieren. Mögliche Herstellfehler, wie Poren oder Delaminationen, können einen negativen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten des Bauteils haben. Mittels der CT-Untersuchungen und der Defektanalyse der Software VGStudioMax können keine Poren mit Durchmesser  $> 0,2$  mm und auch keine sonstigen auffälligen Werkstoffschädigungen gefunden werden, so dass eine gute Herstellqualität des gesamten Bauteils angenommen werden kann (s. *Abb.5*).



*Abb.5: 3D-Modell des unbelasteten Bauteils: Abschnitt 2, ohne sichtbare Schädigungen*

#### 3.2 Computertomographische Untersuchung des belasteten Bauteils

Nach der Durchführung des Ermüdungsversuchs wird das Bauteil computertomographisch untersucht, in dem drei separate CT-3D Modelle entsprechend der in *Abb.4* festgelegten Abschnitte erstellt werden. Zunächst werden die Modelle mittels der automatischen Defektanalyse der Software untersucht. Die Ergebnisse des Abschnitts 1 sind in *Abb. 6* exemplarisch gezeigt. Es ist zu erkennen, dass in diesem Abschnitt des Bauteils die größte Anzahl an Defekten auftreten. Die Defekte verteilen sich zwischen dem Flankenbereich und der Mitte des Bauteils, wobei die Defekte mit dem größten Volumen an dem Radienübergang zur Flanke auftreten. An dieser Stelle bildet sich der Defekt flächig aus, wie in *Abb.6* zu sehen ist.

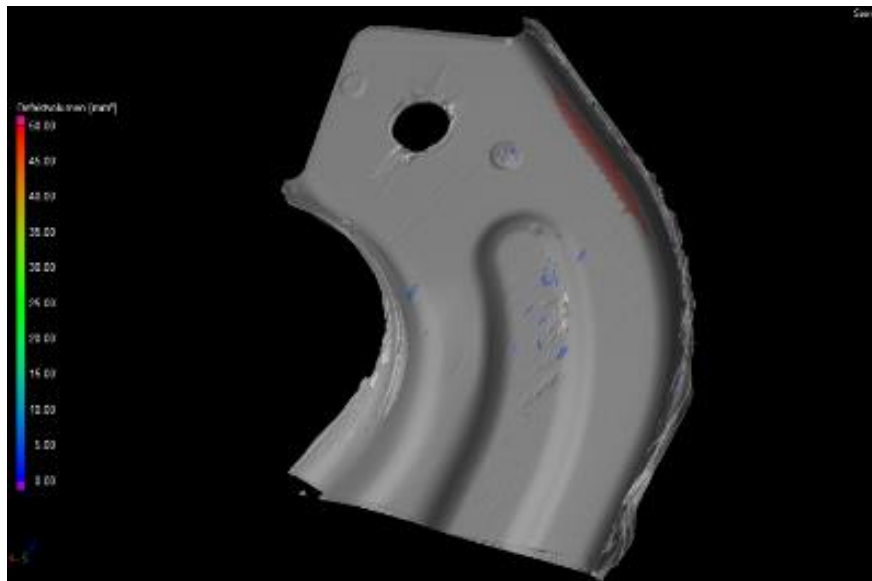


Abb.6: CT 3D-Modell des Bauteils nach einer Ermüdungsbelastung, hier nur Abschnitt 1

Um die Defekte zu lokalisieren und somit die Schädigungsmechanismen zu bestimmen, wurden 2D-Schnittbilder aus dem 3D-Modell extrahiert und analysiert. In allen 2D-Aufnahmen sind zwei Bereiche mit unterschiedlichen Graustufen zu erkennen. Der hellere Bereich stellt das Aluminium und der dunklere den CFK dar.

In Abb. 7 ist zu erkennen, dass an dem Biegeradius zur Flanke hin eine Delamination zwischen dem Aluminium und dem CFK auftritt.

Auf der in Abb. 7 gezeigten Stelle der Delamination ist auf der gegenüberliegenden Flanke ebenfalls ein ähnlicher Defekt festzustellen, allerdings mit einem kleineren Volumen. Im Allgemeinen zeigt sich, dass die aktuelle Stelle bei der Umformung von vergleichbaren Bauteilen als kritisch anzusehen ist und auch während der Herstellung dort mit Versagenserscheinungen zu rechnen ist [1].

Im mittleren Bereich in Abschnitt 1 (Abb. 8) sind kleinere Defekte in der Matrix detektierbar, die vom Auswertungsprogramm nicht eindeutig auszuwerten sind. Dies liegt an der begrenzten Auflösung des CT- Geräts von 0,2 mm. Solche Defekte können Mikrorisse in der Matrix sein, die aufgrund der schwingenden Beanspruchung verursacht wurden und durch weitere Schwingspiele zu größeren Zwischenfaserbrüchen (Zfb) führen können [2].



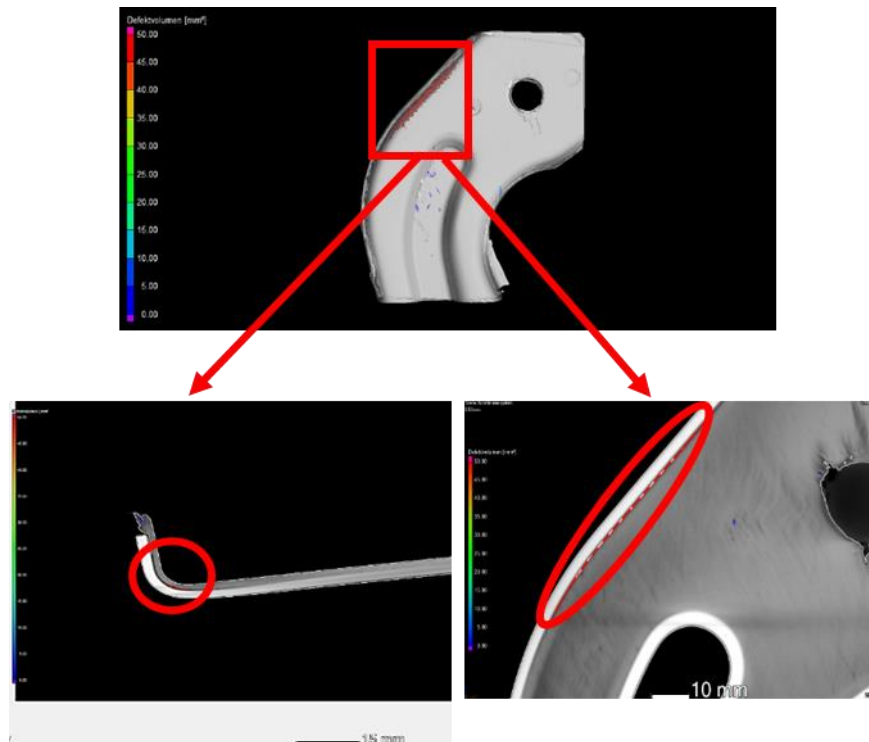


Abb.7: Belastetes Bauteil, Abschnitt 1: a) 3D Modell, b) Schnittbild in XY-Ebene, c) Schnittbild in XZ-Ebene

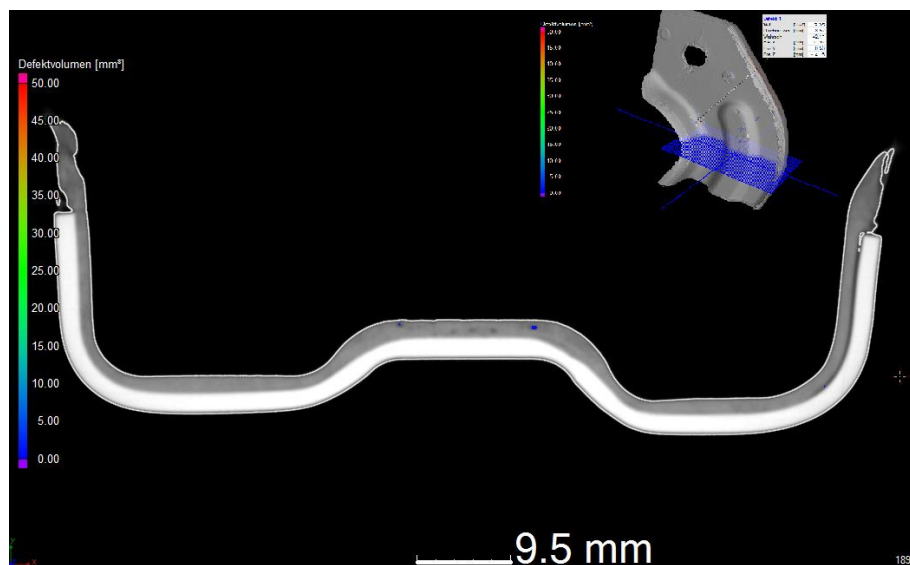


Abb.8: Belastetes Bauteil, Abschnitt 1: Schnittbild an Ebene XY mit kleinen Defekten (Mikrorisse, Zfb)

Die festgestellten Schädigungsmechanismen, die ausgeprägt an den kritischen Biegegradienten des Bauteils auftreten, können mit zunehmender Ermüdungsbelastung ein Bauteilversagen an diesen Stellen bewirken [3]. Diese Stellen mit großer Schädigung sind auch



im statischen Zugversuch die Bereiche, die zum Versagen führen. In Abb. 9 ist das statische Versagen durch das Voranschreiten eines Hauptrisses von dem äußeren Rand des Biegeradius zu sehen. In ersten FEM Simulationen wurden diese Bereiche auch als kritisch bewertet.

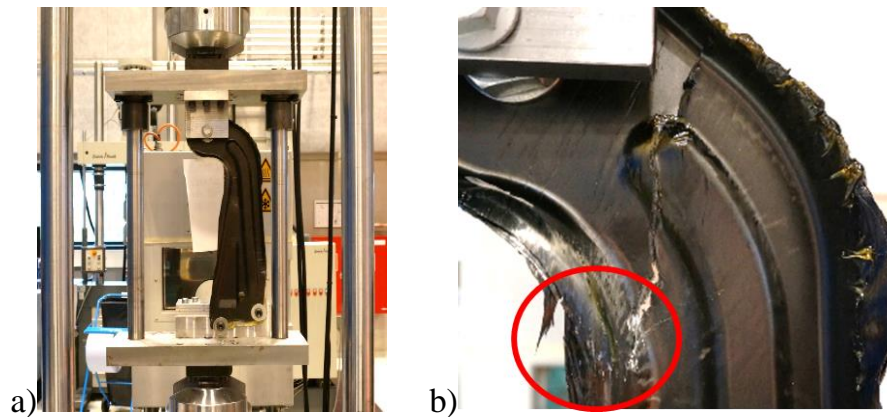


Abb.9: Zugversuch. a) eingespanntes Bauteil, b) Versagen des Hybridbauteils bei 15,6 kN

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Durch die Computertomographie wurde ein hybrides Bauteil aus Aluminium und CFK zerstörungsfrei nach der Herstellung und nach einer Ermüdungsbeanspruchung im Zugschwellbereich untersucht. Das durch einen optimierten Prepreg-Press-Prozess hergestellte Bauteil zeigt keine eindeutigen herstellungsbedingten Defekte. Aufgrund der Ermüdungsbelastung ergeben sich Schädigungen an den kritischen Biegeradien des Bauteils im Abschnitt 1. Insbesondere wurde an dem äußeren Flankenbereich eine großflächige Delamination detektiert und an der gegenüberliegenden Flanke weitere ähnliche, kleinere Schädigungen. Diese Bereiche der Ermüdungsschädigungen entsprechen der Versagensstelle, bei der das Bauteil auch im Zugversuch versagt. Ferner sind in dem mittleren Bereich des Abschnitts 1 des Bauteils zusätzliche kleine Zwischenfaserbrüche festzustellen.

Um das Ermüdungsverhalten besser zu verstehen, ist es sinnvoll, noch weitere Belastungsstufen bis zum kompletten Versagen computertomographisch zu untersuchen, vor allem, da sich die zerstörungsfreie Prüfmethode als vielversprechend für die Analyse der Versagensmechanismen erweist. Weitere numerische Simulationen könnten die genauen Spannungsverteilungen bei der Ermüdungsbeanspruchung aufzeigen, um diese dann mit den Schädigungen aus den CT Untersuchungen zu vergleichen.

## **Literatur**

- [1] Fritz A.H., Schulze G. (eds) Fertigungstechnik. Springer-Lehrbuch. Springer, Berlin, Heidelberg, 1998, ISBN 2978-3-540-63852-0
- [2] Ramesh R. Talreja und Chandra Veer Singh. Damage and Failure of Composite Materials. Cambridge University Press, 7. Juni 2012. 314 S. ISBN: 0521819423
- [3] Neitzel, M.; Mitschang, P.; Breuer, U. (2014): Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung. Carl Hanser Verlag, 2. Auflage, München

## **Autorenanschriften**

Dr.-Ing. Manel Ellouz

Fachhochschule Bielefeld

Bielefelder Institut für Angewandte Materialforschung

Interaktion 1

33619 Bielefeld

Telefon: +49 (0) 521/106-70222

E-Mail: manel.ellou@fh-bielefeld.de

Julian Löseke, M.Sc.

Universität Paderborn

Lehrstuhl für Leichtbau im Automobil (LiA)

Telefon: +49 (0) 5251/60-5939

E-Mail: julian.loeseke@uni-paderborn.de